

# 柔軟な超薄膜板ガラス (4 $\mu\text{m}$ ) のナノスケール加工方法の 開発とその応用の開拓

奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学領域 ヤリクン ヤシャイラ

Development of Fabrication Method for Ultra-Thin Glass Sheet and its Applications at  
Nanoscale

Yaxiaer Yalikun

Division of Materials Science, NARA Institute of Science and Technology

超薄板ガラスの厚みはわずか数マイクロであるため、従来のレーザー加工手法では、液中で加工面に焦点が合わせられないし、超短パルスレーザー加工による微小衝撃でも破裂する。また、後継工程にさらに欠損が入る可能性が高いため、超薄型ガラスの応用範囲は限られている。超薄型ガラスの加工には、取り扱い方法、焦点合わせ方法、後継工程の再考案を含む、新たな技術の開発が必要である。本研究では上記の超薄型ガラス加工の問題点を解決すべく、従来の超短パルスレーザーの加工原理を用い、申請者のこれまで薄板ガラスデバイスの加工経験生かし、協力者の知恵と設備を利用し、柔軟な薄板ガラスの生産とナノスケール加工方法を開発し、その応用開拓に成功した。

Since the thickness of the ultra-thin glass is only a few micrometer, using conventional laser fabrication methods for normal glass material are facing problems such as cannot focus on the target machining surface in the cooling liquid, and micro checks even happens with a impact of ultrashort pulse laser irradiation. To reduce the high possibility of ultra-thin glass damage, processing of ultra-thin glass requires the development of new technologies including handling methods, focusing methods, and redesigning the flow of processes. Therefore, in this research, in order to solve the above problems, based on the principle of the conventional ultrashort pulse laser, by taking the advantage of applicant's experience in processing of the ultra-thin glass devices, and utilizing the wisdom and equipment of our collaborators, we have developed a processing method for ultra-thin glass production, and also explored its applications.

## 1. はじめに

ガラス材料は物理的、化学的、光学的に優れた特性を有し、高耐熱・高純度・高絶縁・高耐圧が求められる製造プロセス用途として、半導体をはじめ幅広い産業で使用されている。特に極めて薄い板ガラス(厚みは数マイクロメートルから数十マイクロメートル、超薄板ガラスと言う)はディスプレイ、タッチカバー(高耐久)、指紋センサー(高い誘電率)、カメラモジュールカバー(高い透過率)、ICパッケージ(高帯域での低誘電損失)、薄膜バッテリー(化学的に安定、耐高温)などの応用において、極めて高い優位性を示し、今後の需要増加が考えられる業績[1]。上記の分野の需要と潜在市場を重視し、近年各ガラスメ

ーカーは薄板ガラス(厚みが  $30\mu\text{m}$  以下の板ガラス)の生産技術と生産能力向上に力を入れている。国内外数社からすでに厚み  $30\mu\text{m}$  以下の薄板ガラス商品が市販されている。例えば、厚みは  $4\mu\text{m}$  の超薄板ガラスもある。ここまで薄くすると軽量なフィルム状になり、よく曲がる。ガラス材料であるため、柔軟な頑丈で電気性能、耐久性の優れたデバイスの作製は可能になる。しかし、従来のガラスの加工技術は、前処理、固定、洗浄などの加工手順が多く、ガラスに破損や不要なひび割れが発生するリスクが高いため、柔軟で薄いガラスの加工に適さない。MEMS加工実績を多数有する申請者グループは従来のMEMS技術で上記の厚み  $4\mu\text{m}$  の薄板ガラスの加工を複数回慎重に試みたが、図2のように、試料がどうしても割れてしまう。その原因は、薄板ガラスにMEMS加工による小さいクラックが生じ、構造上に弱点になり、柔軟性はともかく、元の形状さえ維持できなくなる。これまでの手法には試料の高精度把持困難、マイクロメートルスケールでの加工制限、生産性低い、加工を臨機応変に対応できないという問題点がある。超薄板ガラスの応用展開を実現するために薄板ガラスの加工精度向上できる、損傷のない、高密度な構造体加工が可能な技術を開発する必要がある。

## 2. 実験目的と方法：

①薄板ガラス加工の精度向上：従来手法と同様に空気中で、薄板ガラスをマイクロから数十ナノ - 数百ナノメートルのスケールで加工できるようにするために、まず、薄板ガラスの表面を平坦に把持する治具の設計と作製を行った。その次、従来の顕微鏡の光学シス



図1. 超薄板ガラスは通常ガラスの特性を有する上に、応用可能な領域はさらに広い。

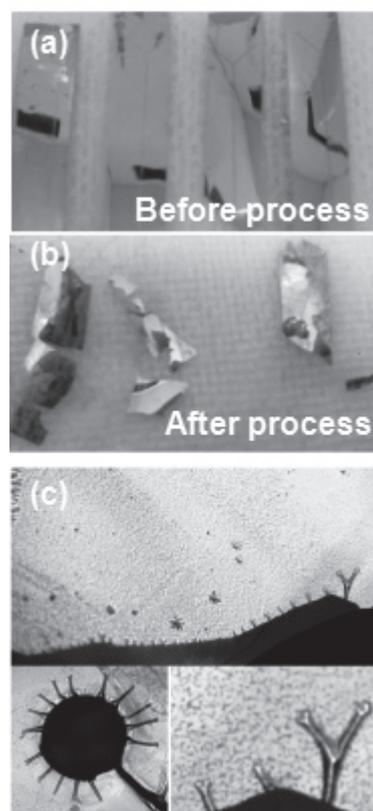


図2. 超薄板ガラスの加工及びその現状。(a)表面にCr, Auで2重制膜した超薄板ガラス。(b)ドライ、ウェットエッチング済みの薄板ガラス(c)表面欠損の顕微写真。

テムに、レーザー反射を採用した非接触型焦点フォーカシング機能を搭載した。ガラス表面の微小な歪みを検知し、光学系の複数のレンズの位置補正を行い、安定した高精度加工を実現した。さらに、より面積の広い薄板ガラスの作製を実現するため、図3と図4にあるような負荷荷重制御型超薄板ガラス作製システムを開発した(詳細は業績[2])。最後に、加工に関する一連のプロセス(洗浄など)を最適化した。

**②応用開拓のため多種類の加工方法の開発：**超薄板ガラスを搭載するデバイスの市場は計測、マイクロ流体デバイス、半導体(電極作製)と想定しているが、それぞれの領域での十分な実績はまだなく、加工の種類も実際の応用ごとによって変わる。特に、主流のMEMS(微小な電気機械システム、Micro Electro Mechanical Systems)デバイス作製には、浅堀、深堀、切断、貫通4種類の加工が必要である。これらの加工には複数高価な機械、長い加工時間、複数化学薬品を要する。特にガラスの高精度切断と貫通は容易ではない。しかし、薄板ガラスという材料の登場によりガラス材料の切断と貫通加工が本手法を利用すれば、手軽に実現可能になったため、従来の加工技術に制限された超薄板ガラスの応用展開を可能にした。

本研究で開発した薄板ガラス加工技術を利用して作製したデバイスは、計測、光学、生命科学分野での利用が可能であり、本技術の応用展開が実現できた。

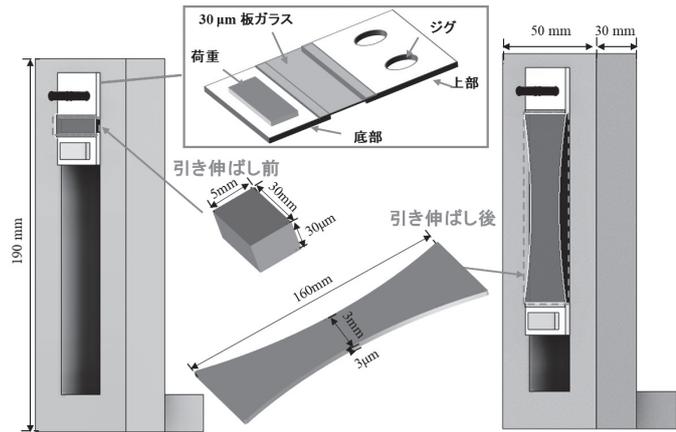


図3. 負荷荷重制御型超薄板ガラスの作製システム。通常の薄板ガラス(厚み 30 $\mu\text{m}$  以上)を厚み任意の超薄板ガラス(厚み 3 $\mu\text{m}$  以下)へ引き伸ばして生産可能なシステムである。引き伸ばし作業の荷重制御のみで、簡単に実現可能である。(詳細は業績[2]、特許申請中)

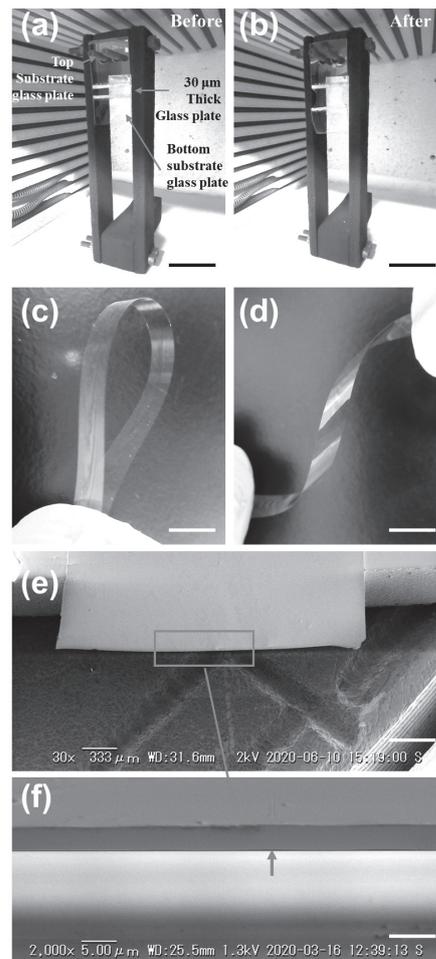


図4. 負荷荷重制御型超薄板ガラスの作製システムと作製できた超薄板ガラス。(a)引き伸ばし作業前(b)引き伸ばし作業後。(c)(d)(e)(f)は引き伸ばし作業で得られた厚み 3 $\mu\text{m}$  の超薄板ガラス。(詳細は業績[2])

### 3. 結果と応用の展開

#### 3.1 超薄板ガラスを用いたカンチレバー型流速センサーの開発(業績論文3)

マイクロ流体デバイス分野において、マイクロ流路内の液体の流速は様々な機能を実現するための欠かせない重要なパラメーターである。そこで、デバイスの本来の機能を損なわずに、流路内の流速を精密に測定することが重要な課題となる。

これまでの既存手法は熱伝達・拡散検出、または MEMS 技術で作成した複雑な構造体の変形を用いて、流速の計測を実現されたが、マイクロの流路を流れる生体・化学的な試料への熱的な影響、マイクロスケールの流れに乱れをもたせなど、機能を損なう場合がある。一方、微細な粒子をマイクロ流路内に導入し、流路中を流れる粒子の流速分布を画像的な手法で計算する方法もあるが、計測システムが複雑・巨大で、流路を汚染する侵襲性がある。

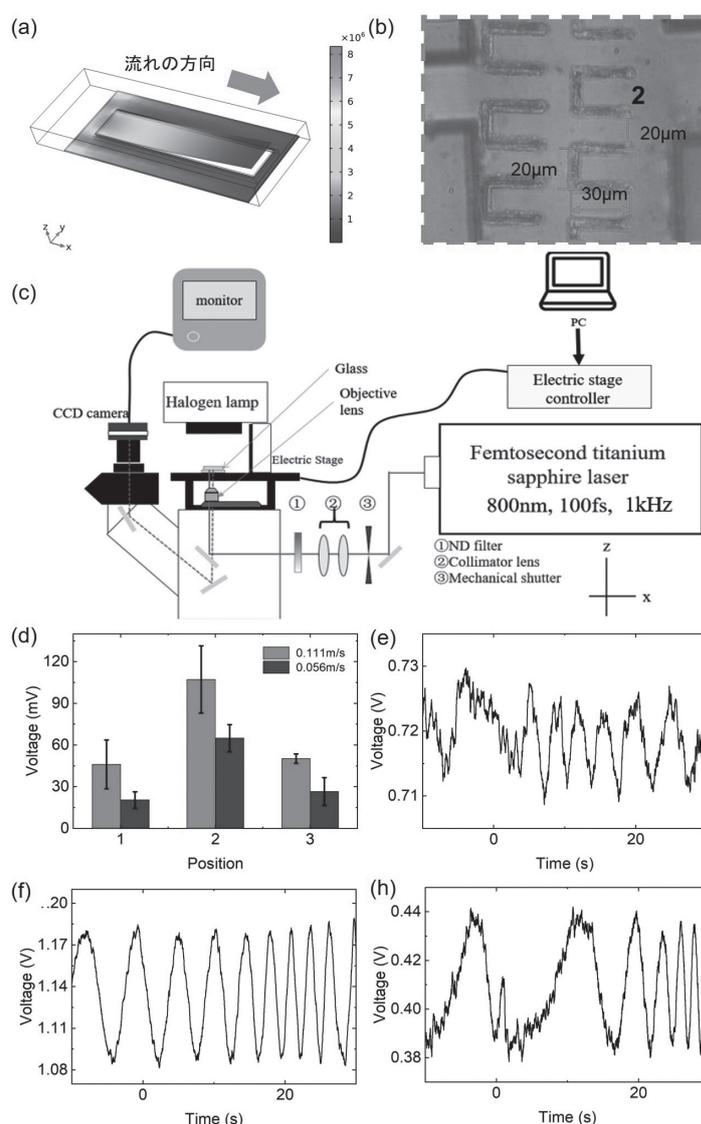


図5. 超薄板ガラスを用いた多点流速計測システム。(a)数値的なシミュレーションを用いて本提案手法の原理を検証した。流速によって、カンチレバー型センサーの変形が誘起される。一定の流速範囲において、センサーの変形は流速との相関性があるため、流速の計測が可能である。(b)と(c)では構築した加工システムと作製した多点カンチレバー型センサーである。(d)-(h)では幅数百マイクロメートルの流路の中で、提案したセンサーをマイクロ流路中に複数作成することによって、一度に流路中での多点流速計測を実現でき、流速のデータが正確に採れていることがわかる。(詳細は業績3)

そこで、マイクロ流体デバイス分野向けの非熱的・簡便・流路への影響がない・非侵襲的なマイクロ流路中での流速計測技術の開発が期待されている。本研究では超薄板ガラスの加工技術を活かし、厚さ  $4\mu\text{m}$  と  $10\mu\text{m}$  のカンチレバー型のセンサーをマイクロ流路の底面に固定された超薄板ガラスに加工し、流速に比例したセンサーの微細な変形をレーザー反射法で検出し、流速を計測する方法を提案し実現した。本加工手法は上記にある優れた特徴を有する流速センサーの開発を成功させた。

### 3.2 超薄板ガラスの加工技術を用いて作製した微小粒子操作システムの開発(業績論文4,5)

細胞のエキソソームをはじめとするナノ粒子の分離、分取と分析はがんの転移メカニズムなどの研究に不可欠である。従来方法では超遠心分離や沈殿などでナノ粒子と細胞などの分離を実現していたが、既存手法には長い操作時間、低い回収率、不純物混入などの欠点がある。

本業績研究では、超薄型ガラスの加工技術を生かし、薄板ガラス表面への微細加工を行い、マイクロからナノスケールの生体試料の高速・高純度分取技術の開発を実現した。提案した分取デバイスには主に3つの異なるセクションが搭載されている。その主要部分であるナノ粒子を細胞との混合液から分離・純化するマイクロV字パターン構造部(試料の純化)(下図)は本手法を用いて加工した。V字パターン構造部はマイクロサイズの流路の中心部を指す水流を生じされる機能を有し、その効果は加工したパタンの深さに影響される。仮に数マイクロサイズの粒子がこの領域にある場合、水流によって、チャンネル中心部へ押されが、ナノ粒子はほとんど影響されないため、マイクロスケールの細胞とナノスケールのエキソソームの分離が実現可能である。

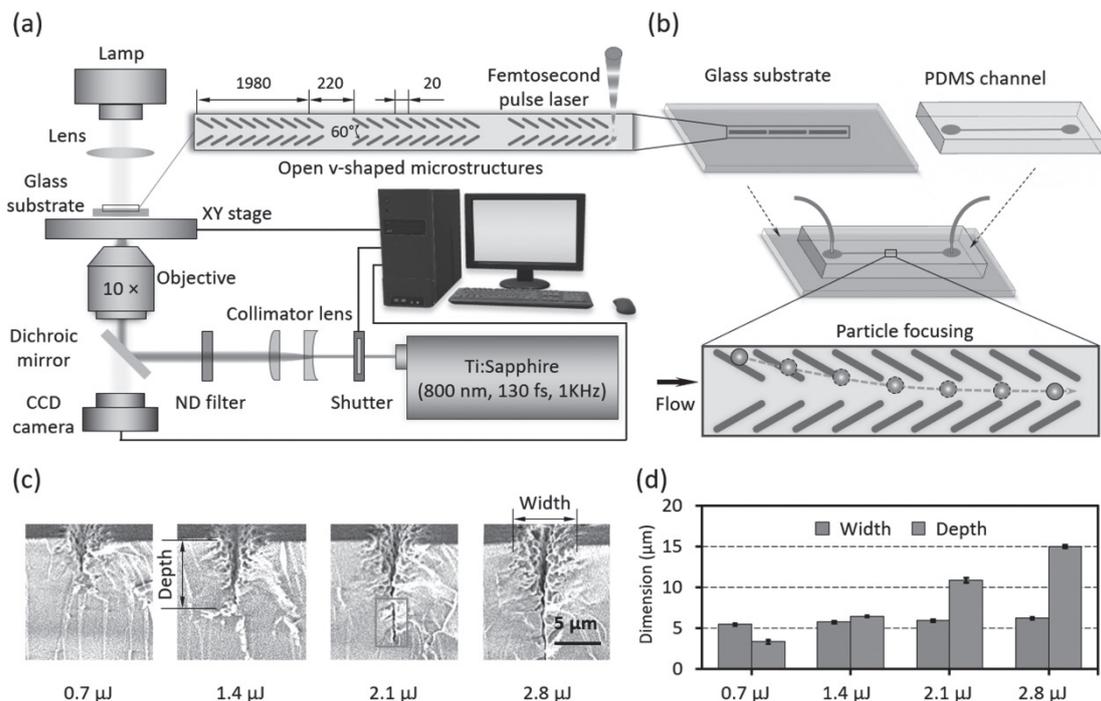


図6. マイクロV字パターン構造部の超短パルスレーザー加工の検討。(a)超短パルスレーザー加工システムの構成模式図になる。編集したプログラムによって、数百個のV字のパターンは自動的に加工される。(b)本デバイスはPDMSチャンネルと薄板ガラス基盤の2重構造になっている。(c)照射する超短パルスレーザーのパルスエネルギーによって、パタンの深さは制御可能である。(d)深さはレーザーパルスエネルギー依存性があるが、幅はほぼ変わらなかった。

### 3.3 超薄板ガラスの加工技術を活かしたほかの応用例(業績論文6,7,8,9,10)

本研究で開発した加工技術の汎用性が高く、超薄板ガラス材料の加工だけではなく、立体的なガラス材料または電極などの加工にも応用可能であることを示している。例えば、マイクロガラスドーム構造の作製(図7(a))に必要な薄肉ガラス材料の切断などには当技術を利用すれば、加工領域が限定可能であり、ドーム構造の機能性向上に繋がる。さらに、ドーム構造をレンズ化し、本手法の加工精度の制御性にも貢献が期待できるため、技術的な相乗効果が期待できる(図7(b,c))。また、微弱な力を活かす駆動システム(図7(d))では、力から変位などへ変換できる膜構造の部品(弁またはポンプの場合)が必要であり、優れる特徴を有する超薄板ガラス材料が適している。そこで、本手法はそれを実現可能にするため、従来のシステム性能の向上が期待できる。

最後に、ガラスでの電極加工にも、本手法の利用が可能である。当チームはマイクロ流体デバイスの流路に不平行電極配置を採用したインピーダンス測定システムを開発し、マ

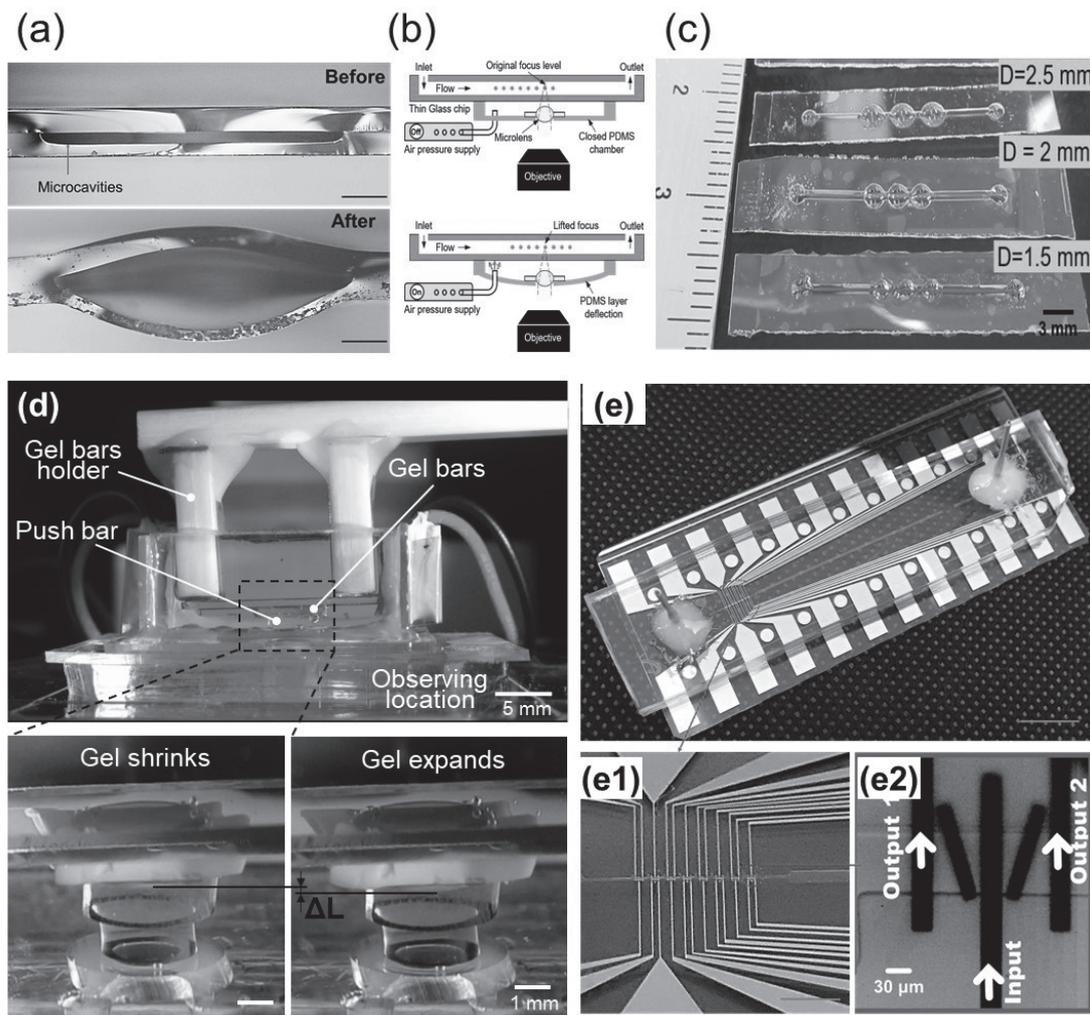


図7. 超薄板ガラスの加工技術の汎用性を示す応用例。(a)ガラスの熱膨張特性を利用したマイクロスケールのドーム構造作製手法では、ドーム壁の肉厚が薄いため、壁加工には本手法が必要である。(b)(c)軽量のドーム構造をレンズ化し、レーザー焦点の光学システムに集積することによって、従来のレーザー加工の位置制御などに貢献できる。(d)微小な力による駆動されるシステムには、膜構造のコンポーネントが必要であり、その加工に本手法の利用は可能である。(e)効率よく高密度、高精度な電極を搭載したMEMSデバイスを作製するために本手法が必要である。

イクロスケールのチャンネルを流れるミドリムシのサイズ・チャンネルでの位置・形状(細い・太い)の計測を実現した。しかし、間隔の狭い(数 $\mu\text{m}$ )電極加工の成功率が低く、実験の効率が悪いという問題に直面していた。そこで、本手法で開発した加工技術では、基盤のガラスを損傷せずに、薄い電極のみに集光し、加工を実現するため、本来のデバイス作製の効率向上へ大きく貢献できた。

#### 4. 結論

本研究では厚みがわずか数マイクロの超薄板ガラスの作製と加工技術の開発に成功した。さらに、開発した高精度な加工技術を用いて、複数の応用展開を行い、本技術の有用性、汎用性、と進歩性を証明できた。これからも、さまざまな分野での応用展開を行い、一層の貢献が期待できる。

#### 5. 謝辞

本研究は、2019年度日本板硝子材料工学助成会の研究助成を受けて行ったものである。同助成会に心より感謝を申し上げます。

#### 6. 参考文献(業績)

1. Tao Tanga, Yapeng Yuanb, **Yaxiaer Yalikulun\***, Yoichiroh Hosokawa, Ming Li, Yo Tanaka, *Sens. Actuators B Chem.*, 339, 12985915, (2021).
2. Yapeng Yuana, **Yaxiaer Yalikulun\***, Satoshi Amaya, Yusufu Aishan, Yigang Shen, YoTanaka, *Sens. Actuator A Phys.*, 321, 15, 112604, (2021).
3. Yansheng Hao, Yo Tanaka, Yoichiroh Hosokawa, Ming Li, and **Yaxiaer Yalikulun\***, *Appl. Phys. Express*, 15, 036502, (2022) A gas flow velocity sensor
4. Tianlong Zhang, Misuzu Namoto, Kazunori Okano, Eri Akita, Norihiro Teranishi, Tao Tang, Dian Anggraini, Yansheng Hao, Yo Tanaka, David Inglis, **Yaxiaer Yalikulun\***, Ming Li\*, and Yoichiroh Hosokawa, *Sci. Rep.* 11, 1652 (2021)
5. Tianlong Zhang, Yigang Shen, Ryota Kiya, Dian Anggraini, Tao Tang, Hanaka Uno, Kazunori Okano, Yo Tanaka, Yoichiroh Hosokawa, Ming Li, **Yaxiaer Yalikulun\***, *Biosensors*. 11 (8): 263. (2021)
6. Yusufu Aishan, **Yaxiaer Yalikulun\***, Satoshi Amaya, Yigang Shen, and Yo Tanaka, *Appl. Phys. Lett.* 115, 263501 (2019)
7. Yusufu Aishan, **Yaxiaer Yalikulun\***, Satoshi Amaya, Yigang Shen, and Yo Tanaka, *Appl. Phys. Express*, 13, 2, (2019)
8. Yusufu Aishan, **Yaxiaer Yalikulun\***, Satoshi Amaya, Yigang Shen, and Yo Tanaka, *Actuators*, 9 (3), 73, (2020)
9. Yusufu Aishan, **Yaxiaer Yalikulun**, Yigang Shen, Yapeng Yuan, Satoshi Amaya, Takashi Okutaki, Atsuhito Osaki, Shingo Maeda, Yo Tanaka, *Sens. Actuators B Chem.* 337, 15, 129769, (2021)
10. Tao Tang, Xun Liu, Ryota Kiya, Yigang Shen, Yapeng Yuan, Tianlong Zhang, Kengo Suzuki, YoTanaka, MingLi, Yoichiroh Hosokawa, **Yaxiaer Yalikulun\***, *Biosens. Bioelectron.*, 193, 113521, (2021)